

## Monitoring und Visualisierung von Carbon Footprints im urbanen Raum

*Sebastian Petsch, Luc Heischbourg, Kerstin Müller, Subhrajit Guhathakurta, Hans Hagen*

(Dipl.-Ing. Sebastian Petsch, TU Kaiserslautern, petsch@cs.uni-kl.de) (Luc Heischbourg, TU Kaiserslautern, luc@heischbourg.com)

(Dr. Kerstin Müller, TU Kaiserslautern, kerstin-mueller@cs.uni-kl.de) (Prof. Dr. Subhrajit Guhathakurta, Arizona State University, subhro.guha@asu.edu) (Prof. Dr. Hans Hagen, TU Kaiserslautern, hagen@informatik.uni-kl.de)

### 1 KURZFASSUNG

Im Zuge des stetig fortschreitenden Klimawandels gewinnt ein aktiver Klimaschutz zunehmend an Bedeutung. Insbesondere die Bekämpfung bzw. Reduzierung von Treibhausgas resultierenden Emissionen stellt eine große und notwendige Herausforderung dar. Der Begriff „Carbon Footprint“ beschreibt die Menge der Emissionen von CO<sub>2</sub>, welche von Einzelnen oder auch von Organisationen verursacht werden. In diesem Paper stellen wir nicht nur ein Monitoring-System von Kohlenstoffdioxid-Emissionen auf Nachbarschaftsebene vor, sondern bieten zudem eine neue Form der Darstellung dieser Ergebnisse, welche über die zweidimensionalen GIS-Visualisierungen hinausgehen, und somit der Darstellung multidimensionaler räumlicher Daten Rechnung tragen. Als Aktionsraum unseres Ansatzes dient Maricopa County in Arizona, USA.

Unser System beinhaltet eine gridbasierende Berechnung und Darstellung von möglichen CO<sub>2</sub>-Emissionen verschiedener Haushaltstypen für die nächsten 20 Jahre für verschiedene Szenarien. Dabei ist es notwendig, zwischen drei verschiedenen Arten von Emissionen zu unterscheiden. Wir differenzieren Haushaltsemissionen, Emissionen verursacht durch Mobilität sowie Emissionen der Industrie. Nur so ist es möglich, einen allgemeinen Carbon Footprint zu charakterisieren und letztlich auch zu berechnen. Um die Ergebnisse zu visualisieren, entwickelten wir einen intuitiven Ansatz zum Erstellen von dreidimensionalen Oberflächen für die berechneten Carbon Footprints. Unter Verwendung von verschiedenen und transparenten Ebenen ermöglicht diese Form der 3D-Darstellung ein einfaches Verständnis sowie Vergleichsmöglichkeiten der resultierenden multidimensionalen Ergebnisse.

### 2 EINLEITUNG

Der Klimawandels und die daraus resultierende Notwendigkeit zur Bekämpfung und Reduzierung von Treibhausgas resultierenden Emissionen haben sich zu bedeutenden Problemfeldern der heutigen Umweltpolitik entwickelt. Ein aktiver Klimaschutz gewinnt somit zunehmend an Bedeutung und stellt eine große und notwendige Herausforderung dar. Bereits 1992 während der U.N. Konferenz über Umwelt und Entwicklung in Rio wurde als wichtiges Ziel festgehalten, die Öffentlichkeit bzw. die Verbraucher über die ökologischen Auswirkungen ihres täglichen Konsums zu informieren. Heute, fast 17 Jahre später, können wir immer noch nicht davon ausgehen, dass sich jedermann im Klaren darüber ist, welche Auswirkungen die persönlichen Verhaltensweisen hinsichtlich Konsum oder Verkehr auf die Umwelt mit sich bringen. Der Einzelne mag sich fragen, inwiefern sein persönliches Verhalten zu drastischen Auswirkungen auf das Weltklima führen soll. Um diese Frage zu beantworten, muss man sich lediglich die Entwicklung der Weltbevölkerung in den vergangenen Jahren vor Augen führen. Heute leben etwa 6,7 Milliarden Menschen auf diesem Planeten. Einer U.N. Studie zufolge wird diese Zahl bis zum Jahr 2050 auf 9,5 Milliarden ansteigen.

Die Literatur liefert uns eine Bestätigung für das komplexe Zusammenspiel von Bevölkerungsgröße und Auswirkungen auf die Umwelt (Jöst, 1999). Diese sind das Resultat von Bevölkerungsgröße, Technologiestand sowie Wohlstandsgrad. Wichtig ist an dieser Stelle die Bedeutung von urbanem Lebensraum für die Entwicklung der CO<sub>2</sub> Emissionen. Laut einer U.N. Studie (United Nations 2009) leben heute (Stand 2007) etwa 49% der Weltbevölkerung im urbanen Raum. Bis 2050 sollen es bis zu 70% sein. All dies macht es notwendig, Strategien und Lösungen zu finden, um die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren. In erster Linie muss allerdings auch deutlich gemacht werden, über welche Größenordnung wir bei den beschriebenen Emissionen überhaupt sprechen.

Der Begriff „Carbon Footprint“ beschreibt nun die Menge der Emissionen von CO<sub>2</sub>, welche von Einzelnen oder auch von Organisationen verursacht werden. Wir beschreiben ein Vorgehen, Carbon Footprints für verschiedene Arten von Haushaltstypen zu berechnen als auch in intuitiver und flexibler Weise zu visualisieren.

### 3 ALLGEMEINES VORGEHEN

Wie bereits aufgeführt ist es Ziel dieser Arbeit, CO<sub>2</sub> Emissionen auf Nachbarschaftsebene zu definieren und zu visualisieren. Das wachsende Interesse an diesem Thema spiegelt sich auch in zahlreichen Arbeiten und in der Literatur wider. An dieser Stelle wird kurz und exemplarisch auf einige, der für unseren Ansatz relevanten Arbeiten eingegangen.

Das „Vulcan Projekt“ (2008), finanziert durch die NASA und maßgeblich geleitet durch ein Entwicklungsteam der Purdue Universität, war eines der Pionierprojekte bezüglich CO<sub>2</sub> Monitoring in den Vereinigten Staaten. Die Ergebnisse zeigen die CO<sub>2</sub> Emissionsverteilung für Nordamerika in einem 10 km Gitterraster (eine Gridzelle = 10 km<sup>2</sup>).

Weber (2008) definierte 13 verschiedene Konsumverhaltenskategorien für amerikanische Haushalte. Diese Input-Output Studie zeigte auf, dass die Menge von CO<sub>2</sub> Emissionen proportional ist zu den Aufwendungen (Ausgaben) eines amerikanischen Haushaltes.

Auch andere Arbeiten wie Bryan (2007), Wentz et al.(2002) oder Jones (2005) stellen alternative Ansätze vor, um Carbon Footprints zu berechnen. All diese bieten uns hervorragende Ansatzpunkte für unsere Arbeit.

Unsere Berechnungen und Visualisierungen beruhen auf einem Gitterraster von einer Meile (eine Gridzelle = eine Quadratmeile). Unser Aktionsraum ist dabei Maricopa County in Arizona mit der Metropolregion Phoenix. Der erste Schritt bestand aus einer Charakterisierung der verschiedenen Arten von CO<sub>2</sub> Emissionen. Abbildung 1 zeigt unsere drei verschiedenen Dimensionen eines kombinierten Carbon Footprints, welche das gesamte Portfolio von CO<sub>2</sub> Emissionen aufzeigt, die in dieser Region von Belang sind.

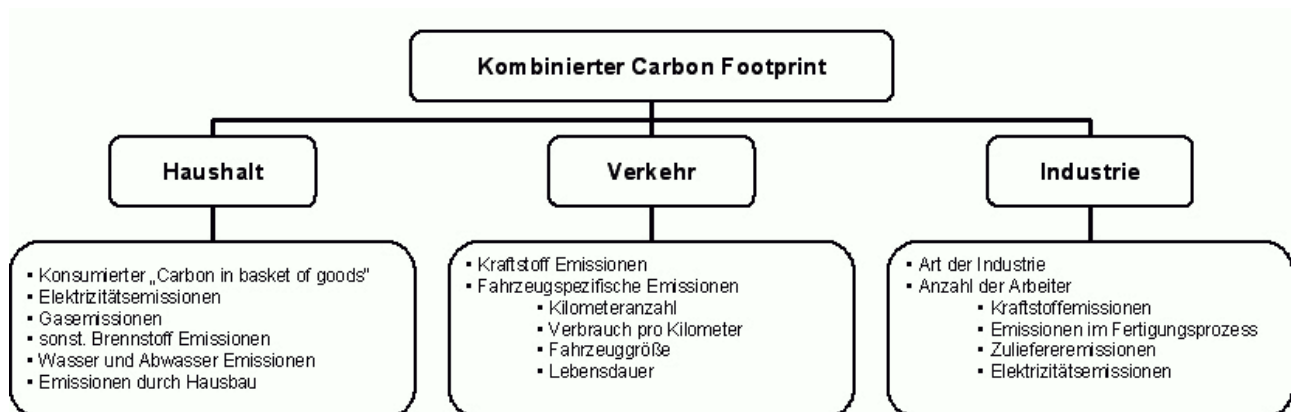


Abbildung 1: Dimensionen des kombinierten Carbon Footprints

Unser Hauptaugenmerk in diesem Paper liegt auf den Dimensionen „Haushalt“ und „Verkehr“. Basierend auf prognostizierten Daten von UrbanSim (2008) zeigen wir Carbon Footprints für zukünftige Jahre sowie verschiedenen Szenarien. Unsere intuitive und flexible Form der Visualisierung erleichtert zudem direkte Vergleiche von Ergebnissen verschiedener Jahre und Entwicklungen.

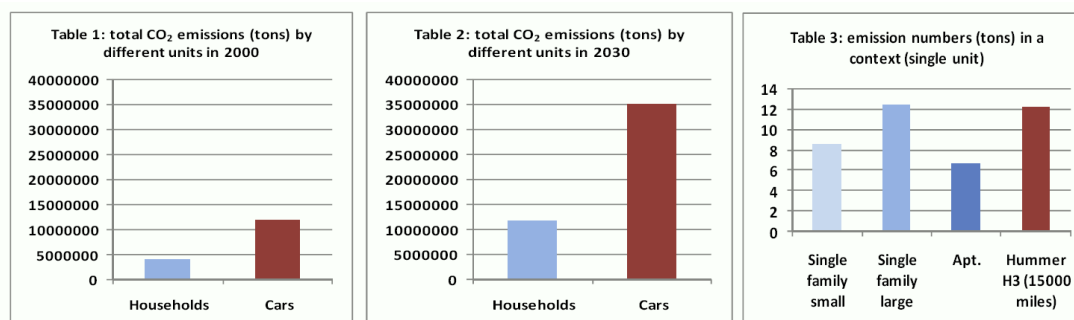
#### 3.1 Erste Berechnungen

Um einen groben Überblick über die Situation zu erhalten, beruhen die ersten Berechnungen auf allgemeine Annahmen und akkumulierten Daten von UrbanSim. Für unsere Dimension „Haushalt“ bedeutet dies, dass wir den durchschnittlichen Stromverbrauch (kWh) von Haushalten in Arizona mit dem Elektrizitätskoeffizienten von Arizona multiplizierten. Diesen lieferte uns die Energy Information Administration der USA (2008). Die Emissionen der Dimension „Verkehr“ erhielten wir, indem wir die Anzahl der Fahrzeuge (Ergebnisse von UrbanSim) mit einem durchschnittlichen Emissionswert für PKW’s multiplizierten.

Die resultierenden Ergebnisse sind natürlich stark limitiert aufgrund keinerlei Unterscheidung von verschiedenen Haushaltstypen oder spezifischen Fahrzeug- oder Transportwerten. Dennoch liefern diese Ergebnisse eine erste Vorstellung über die tatsächlichen CO<sub>2</sub> Emissionen in Maricopa County (sowohl für

zukünftige Jahre als auch für verschiedenste Entwicklungsszenarien) und bieten somit eine gute Ausgangslage für unsere nächsten Schritte.

In den Tabellen 1 bis 3 werden einige prägnante Ergebnisse aufgezeigt. So erkennen wir z.B., dass die jährliche Anzahl von CO<sub>2</sub> Emissionen eines Einfamilienhaushaltes genauso groß sind wie die Emissionen eines Hummer H3. Außerdem wird deutlich, dass die Emissionen, resultierend aus der Dimension Verkehr, fast dreimal so hoch sind wie jene der Dimension Haushalt.



Tabellen 1 und 2 zeigen die Gesamtanzahl an CO<sub>2</sub> Emissionen für Maricopa County für Dimension „Haushalt“ und „Verkehr“ in den Jahren 2000 und 2030. Tabelle 3 vergleicht Einzelwerte miteinander.

### 3.2 Dimension „Haushalte“

Die frei zugänglichen Daten der Expenditure Diary Survey (CES) (2008) bilden die Grundlage für unsere weitergehende Berechnung der CO<sub>2</sub> Emissionen für die Dimension „Haushalt“. Diese CES liefert uns genaue Informationen über verschiedene Haushaltstypen, sowie deren unterschiedlichen Verhaltensweisen mittels zweier verschiedener Arten von Erhebungen (Interview Survey und Diary Survey).

Mit dem Begriff „basket of goods“, welcher uns im weiteren Verlauf dieser Arbeit begleiten wird, werden die Aufwendungen (Ausgaben) von Haushalten beschrieben, wie z.B. das spezifische Einkaufsverhalten oder auch die Inanspruchnahme von bestimmten Dienstleistungen. Tabelle 5 zeigt den in unserer Berechnung zugrunde liegenden „basket of goods“ auf. Grundlage hierfür waren neben der bekannten CES außerdem noch die EIO-LCA10, welche vom Berkeley Institut für Umwelt (2008) bereitgestellt wurde.

Aufgrund der besagten Datenerhebungen haben wir demnach haushaltsspezifische Informationen für einzelne bestimmte „goods“. Die verschiedenen Kategorien von Haushalten sind abhängig von Familiengröße, Einkommensklasse oder auch vom kulturellen Hintergrund der jeweiligen Familien. In Tabelle 6 werden diese einzelnen Kategorien detailliert definiert.

**Table 5: basket of goods**

<u>Food:</u>	
Cereals & bakery products:	741 gCO <sub>2</sub> /\$
Meat, fish and protein:	1452 gCO <sub>2</sub> /\$
Dairy:	1911 gCO <sub>2</sub> /\$
Fruits & vegetables:	1176 gCO <sub>2</sub> /\$
Food away (eating out):	368 gCO <sub>2</sub> /\$
<u>Others:</u>	
Household items:	459 gCO <sub>2</sub> /\$
Services:	178 gCO <sub>2</sub> /\$

**Table 6 : household categories**

<u>Family size:</u>	1 - 8
<u>Income class:</u>	1: less than \$5000 2: \$5000 - \$9999 3: \$10000 - \$14999 4: \$15000 - \$19999 5: \$20000 - \$29999 6: \$30000 - \$39999 7: \$40000 - \$49999 8: \$50000 - \$69999 9: \$70000 <
<u>Race:</u>	White Hispanic African American, or Black American Indian, or Alaska Native Asian

Tabellen 5 und 6 zeigen den „basket of goods“ sowie die verschiedenen Kategorien für Haushalte. Außerdem wird in Tabelle 5 jedem „good“ eine Konstante zugeordnet. Diese besagt, wie viel Gramm CO2 US-Dollar (ausgegeben für dieses „good“) mit in die Berechnung miteingehen.

Des Weiteren liefern die besagten Quellen Informationen über den Energieverbrauch (kWh) für jede der aufgeführten Kategorien. In Verbindung mit dem aus unserer ersten Berechnung stammenden Energiekoeffizienten für Arizona sind wir nun in der Lage, einen detaillierten Carbon Footprint (für Energie) für einzelne Haushalte, als auch für ganz Maricopa County zu berechnen. Als letzten Schritt kombinieren wir nun die Energieemissionen sowie die „basket of goods“-Emissionen und erhalten einen detaillierten Carbon Footprint auf Nachbarschaftsebene. Dies bedeutet, dass unser Modell in der Lage ist, für jede mögliche Kombination der verschiedenen Haushaltskategorien (also für jeden möglichen Haushaltstyp) spezifischen Carbon Footprint zu berechnen.

Unser Modell ist wie folgt aufgebaut. Die Emissionen (für ein bestimmtes Jahr), resultierend aus dem Bereich Energie, werden berechnet aus dem dem kategoriespezifischen Energieverbrauch (KX) sowie aus dem Energiekoeffizienten (C) für Arizona:

$$\begin{bmatrix} E_R \\ E_F \\ E_I \end{bmatrix} (t) = \begin{bmatrix} K_R \times coeff \\ K_F \times coeff \\ K_I \times coeff \end{bmatrix} = C \times \begin{bmatrix} K_R \\ K_F \\ K_I \end{bmatrix} (t)$$

*R = race, F = family size, I = income class and t = certain year*

Mit Hilfe der in unserer Matrix befindlichen Variablen KR, KF und KI können wir zwischen den unterschiedlichen Kategorien wählen. C ist eine Konstante und nicht abhängig von der Zeit (t).

Die „basket of goods“-Emissionen berechnen wir auf gleiche Art und Weise. Genauer gesagt multiplizieren wir hier die Ausgaben eines bestimmten Haushaltstyps für ein bestimmtes „good“ mit dem Koeffizienten für CO2 Emissionen des jeweiligen „goods“. Auch diese Konstanten werden in Tabelle 5 veranschaulicht. Wie zuvor bereits beschrieben, müssen letztlich lediglich beide Emissionswerte miteinander kombiniert werden, um einen Carbon Footprint für die Dimension „Haushalt“ zu erhalten.

### 3.3 Dimension „Verkehr“

Der nächste Entwicklungsschritt bezüglich unserer Dimension „Verkehr“ ist eine auf Gridzellen basierende Berechnung mit Eingangsdaten, welche detaillierter ausfallen als bei unserem ersten Schritt. Zu diesen Daten zählen die Anzahl der Fahrzeuge pro Gridzelle (eine Gridzelle = eine Quadrat-meile), der prozentuale Anteil von Pendlern an der Gesamtbevölkerung pro Gridzelle, die eine bestimmte Strecke in einer bestimmten Zeitspanne zurücklegen, als auch spezifische Werte für CO2 Emissionen von Fahrzeugen, abhängig von der Menge an zurück-gelegten Meilen. Abbildung 2 zeigt den Arbeitsschritt mit Hilfe von GIS, in dem die einzelnen Fahrzeugdaten auf unsere Gridzellenstruktur von Maricopa County kompiliert werden.

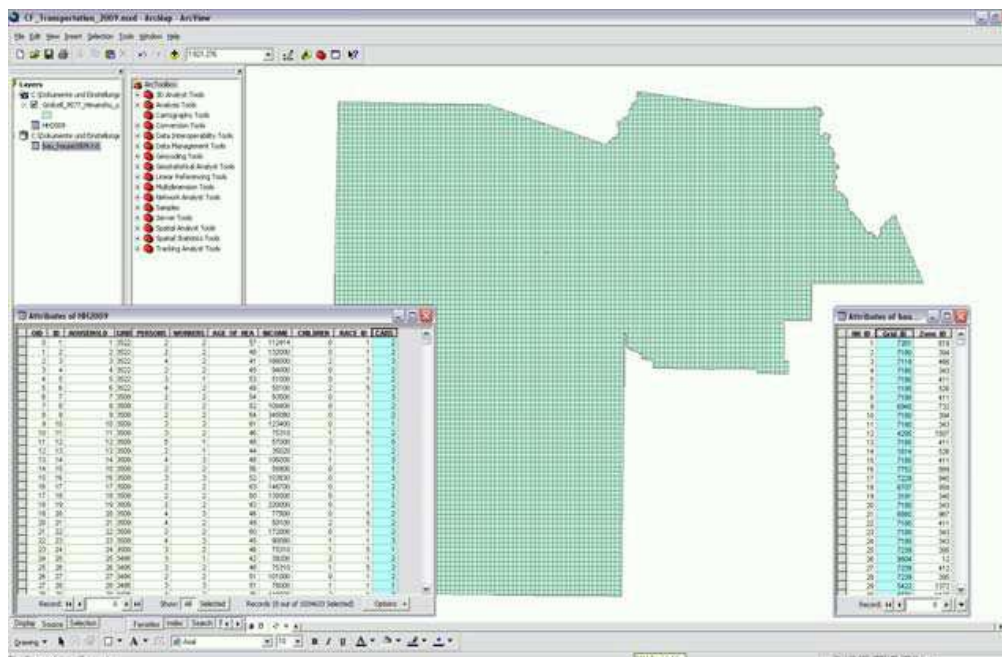


Abbildung 2: Arbeitsschritt mit der Software „ArcGIS“

An dieser Stelle müssen wir allerdings festhalten, dass diese Vorgehensweise einige Einschränkungen aufweist. Wir nehmen hier an, dass jeder Pendler mit seinem eigenen Fahrzeug unterwegs ist. Das bedeutet, dass Fahrgemeinschaften oder dergleichen nicht berücksichtigt werden. Außerdem nehmen wir noch immer an, dass alle Fahrzeuge dieselben CO2 Emissionen aufweisen. Unterschiede bezüglich Fahrzeuggröße oder verschiedener Kraftstoffe werden an dieser Stelle vernachlässigt. Aus diesen Gründen wird es in zukünftigen Arbeitsschritten Aufgabe sein müssen, das Carbon Footprint Modell für die Dimension „Verkehr“ weiter zu detaillieren.

### 3.4 Visualisierung

Ein wichtiger Bestandteil unserer Arbeit ist neben der Berechnung eines spezifischen Carbon Footprints die adäquate dreidimensionale Visualisierung der Ergebnisse. Vergleich mit einer unseren vorangegangenen Untersuchungen hinsichtlich möglicher Darstellungsformen für „Urban Sprawl“ (Petsch et al. 2008) bietet diese Art der Visualisierung nicht nur einen gewissen optischen Reiz oder eine alternative Form der Darstellung, sondern verbessert zugleich die Verständlichkeit und die Ablesbarkeit der Ergebnisse, indem es die Möglichkeit bietet, verschiedenste Ergebnisse (von unterschiedlichen Jahren oder von unterschiedlichen Szenarien) miteinander zu vergleichen. Hinsichtlich der verschiedenen Szenarien ist festzuhalten, dass diese Aussagen und Ergebnisse bezüglich unterschiedlicher Entwicklungen des Bodenmarktes oder auch der Nutzung der bebaubaren Fläche beinhalten. Auf eine tiefere Beschreibung wird an dieser Stelle verzichtet. Bevor wir nun in Kapitel 4 die visuellen Ergebnisse unserer Arbeit präsentieren, wird im nun Folgenden kurz auf die zugrundeliegende Methode unserer Visualisierungsart eingegangen:

Wie bereits erwähnt, basieren unsere Berechnungen des Carbon Footprints für die verschiedenen Dimensionen auf prognostizierten Daten von UrbanSim (2008). Unser Aktionsraum (Maricopa County) wurde hierfür in einzelne Gridzellen (eine Gridzelle = eine Quadratmeile) unterteilt. UrbanSim liefert uns

nun für die Jahre 2000 bis 2030 Haushalts- sowie Entwicklungsdaten für jede der einzelnen Gridzellen. Zu diesen Daten zählen u.a.

- die Anzahl der Fahrzeuge pro Gridzelle,
- die Anzahl der Haushalte pro Gridzelle,
- die Art der Landnutzung oder auch
- die Anzahl der Fahrzeuge pro Gridzelle,

um nur einige der für unsere Berechnung wichtigen Ausgangsdaten zu nennen.

Ziel unseres Ansatzes ist es, einzelne Oberflächen zu generieren, welche schließlich die Ergebnisse der verschiedenen Carbon Footprint-Berechnungen widerspiegeln. Die Lagekoordinaten der jeweiligen Mittelpunkte unserer Gridzellen, sowie die berechneten Carbon Footprint-Werte der jeweiligen Gridzellen bilden die Basis für dieses Vorgehen. Als ersten Schritt generieren wir ein Höhenfeld aus eben diesen Ausgangsdaten. Unsere Carbon Footprint-Werte bilden dabei die eigentliche Höhe. Basierend darauf werden Oberflächen mit einer C0-Kontinuität konstruiert. Abbildung 3 beschreibt diesen Vorgang exemplarisch. Mittels einer Tessellierung der einzelnen Teilflächen des Höhenfeldes erhalten wir die eigentliche Oberfläche. Hierzu verwenden wir die Methode der Coonspflaster (Coons patches).

Coonspflasterung, benannt nach Steven Coons, war ursprünglich eine Methode aus dem Automobilbereich und wurde bei der Konstruktion eines Fahrzeugs für Karosseriefächen eingesetzt. Im Prinzip verläuft dieser Prozess folgendermaßen. Zu Beginn eines neuen Fahrzeugmodells steht ein ordinäres Holz- oder Tonmodell. Mittels CAD wird dieses Modell anschließend digitalisiert. Dabei entstehen einzelne digitale Punkte, durch welche man wiederum einzelne Kurven durchlegen kann. Meist handelt es sich hierbei um interpolierte Splines. Die Coonspflaster erzeugen dann wiederum aus diesem Netzwerk von Kurven eine zusammenhängende Fläche. Coonspflaster reproduzieren stückweise lineare Kurven (welche im Bezug auf planerische Aspekte als besonders geeignet eingestuft werden können) und somit findet hier keine künstliche Glättung statt (also auch keine Verfälschung der eigentlichen Ergebnisse), wie es etwa beim Einsatz von Bézier-Kurven oder B-Splines der Fall gewesen wäre.

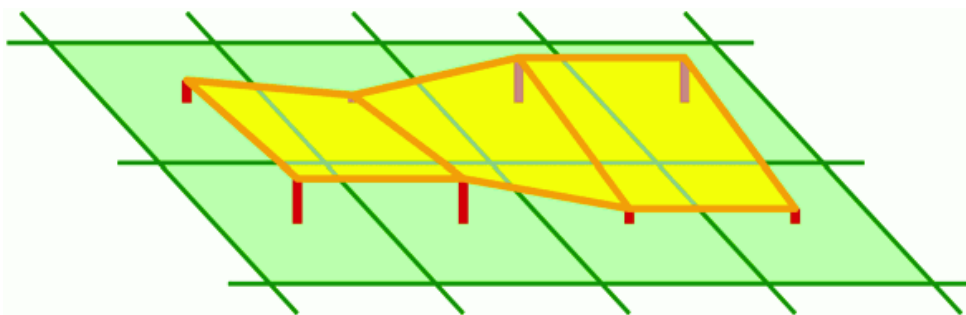


Abbildung3: Reguläre Gridstruktur (grün), Höhenfeld (rot/orange)

Die Methode wird in Abbildung 4 verdeutlicht: Ein „Pflaster“ (patch) wird durch seine vier Eckpunkte A, B, C und D definiert. Ein Punkt P mit den Parametern (u,v),  $0 \leq u, v \leq 1$  kann auf diesem „Pflaster“ berechnet werden durch:

$$P = (1 - u) \cdot (1 - v) \cdot A + u \cdot (1 - v) \cdot B + u \cdot v \cdot C + (1 - u) \cdot v \cdot D$$

Die resultierende Höhenfeldoberfläche besitzt eine C0 Kontinuität. Um die Darstellung einer solchen Fläche zu verbessern, betrachten wir nun die Normalen eines jeden Eckpunktes unseres Höhenfeldes. Diese werden berechnet, indem man den Durchschnittswert aller Normalen der jeweiligen Teilfläche bildet. So können wir z.B. für den Eckpunkt A in Abbildung 4 eine Normale  $N_A$  definieren.

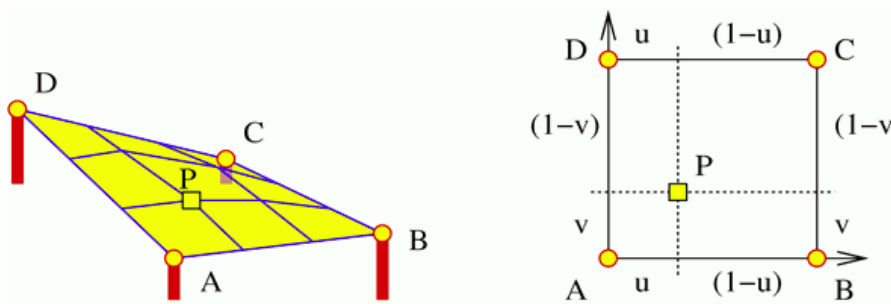


Abbildung 4: Interpolation und resultierende Oberfläche (gelb)

Die Normale des Punktes P wird nun wie folgt berechnet:

$$N_P = (1-u) \cdot (1-v) \cdot N_A + u \cdot (1-v) \cdot N_B + u \cdot v \cdot N_C + (1-u) \cdot v \cdot N_D$$

Durch diese Methode erhalten wir eine geglättete Oberfläche, obwohl diese lediglich eine C0-Kontinuität aufweist. Dadurch erreichen wir einen guten Konsens zwischen Geschwindigkeit beim Erzeugen der Darstellung und Qualität der Darstellung. Außerdem behalten wir dadurch die traditionellen, stückweiselinearen, zweidimensionalen Kurven bei, welche wir anfangs für solch einen Versuch gefordert hatten. Die visuellen Ergebnisse in Kapitel 4 werden aufzeigen, dass mit Hilfe solcher Oberflächen schnelle und anschauliche Vergleiche der Berechnungsergebnisse möglich sind, was letztlich Entscheidungsträgern und Planern als zusätzliches Hilfswerkzeug dienen könnte.

#### 4 ERGEBNISSE

Das folgende Ergebniskapitel ist in zwei Abschnitte gegliedert. Im ersten Teil zeigen wir exemplarisch Ergebnisse unserer detaillierten Berechnungen für die Dimension „Haushalt“. Mit Hilfe unseres zuvor beschriebenen Modells zeigen wir in den Diagrammen 1 bis 3 Ergebnisse des CO<sub>2</sub> Verbrauchs einzelner, klar definierter Haushaltstypen. Diese unterscheiden sich, wie schon erwähnt, in Familiengröße, Einkommensklasse und kulturellem Hintergrund.

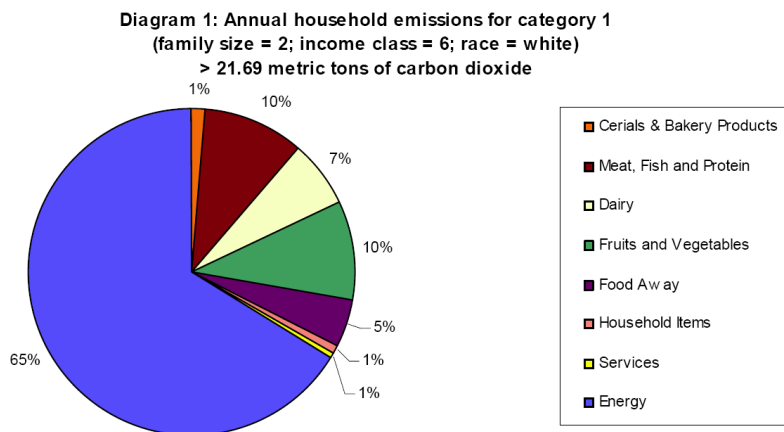


Diagramm 1: Jährliche CO<sub>2</sub> Emissionen für den Haushaltstyp 1

**Diagram 2: Annual household emissions for category 2**  
(family size = 4; income class = 8; race = hispanic)  
> 25.81 metric tons of carbon dioxide

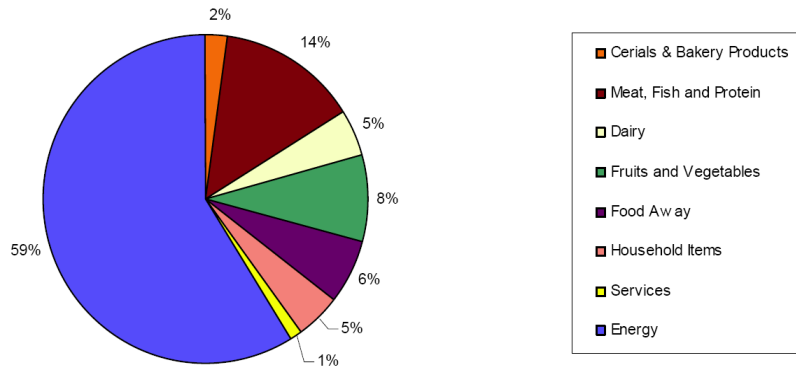


Diagramm 2: Jährliche CO2 Emissionen für den Haushaltstyp 2

**Diagram 3: Annual household emissions for category 3**  
(family size = 1; income class = 4; race = white)  
> 13.04 metric tons of carbon dioxide

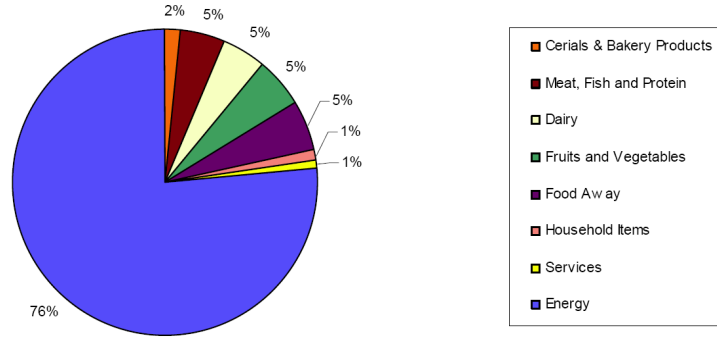


Diagramm 3: Jährliche CO2 Emissionen für den Haushaltstyp3

Anhand dieser Beispiele erkennt man direkt die Vielzahl der Berechnungsmöglichkeiten, die unser Modell anbietet. Ebenso vielfältig und interessant sind die verschiedenen Ansätze, die Ergebnisse miteinander vergleichen zu können und Rückschlüsse über Verhaltensweisen verschiedenster Haushaltstypen ziehen zu können. Um Fehlinterpretationen oder falsche Annahmen zu vermeiden, müssen wir an dieser Stelle festhalten, dass unsere Beispiele rein zufällig gewählt wurden bzw. dass deren Auswahl natürlich auch abhängig von den verfügbaren Daten der CES war.

Der zweite Teil unseres Ergebniskapitels stellt nun die visuellen Ergebnisse dieser Berechnungen mit Hilfe der zuvor beschriebenen Methode der Coonspflasterung dar. Um bestmögliche Visualisierungsergebnisse und Vorteile dieses Ansatzes präsentieren zu können, zeigen die folgenden Abbildungen die Ergebnisse für unseren gesamten Aktionsraum Maricopa County. So werden in Abbildung 5 und 6 die jeweiligen CO2 Emissionen für die Dimensionen „Haushalt“ und „Verkehr“ für das Jahr 2009 dargestellt.

Vergleicht man diese beiden Oberflächen, so kann man sofort erkennen, dass die Menge der Emissionen der Dimension „Verkehr“ um ein Vielfaches größer ausfällt als jene der Dimension „Haushalt“. Ein weiterer Vorteil unseres Ansatzes ist die Möglichkeit, verschiedene Arten von Einstellungen in der Hinsicht zu Monitoring und Visualisierung von Carbon Footprints im urbanen Raum 8 REAL CORP 2009: Cities 3.0 – smart, sustainable, integrative. Strategies, concepts and technologies for planning the urban future verändern, dass sie für die jeweiligen Anwendungsbereiche optimale Ablesbarkeit bieten. Zu diesen Einstellungsmöglichkeiten zählen u.a.

- die Wahl der Perspektive und der Farbe der Oberfläche,
- die Wahl des Transparenzgrades einer Oberfläche,
- der Einsatz von verschiedenen Ebenen oder auch
- die Wahl des Hintergrundes (z.B. Google Earth).



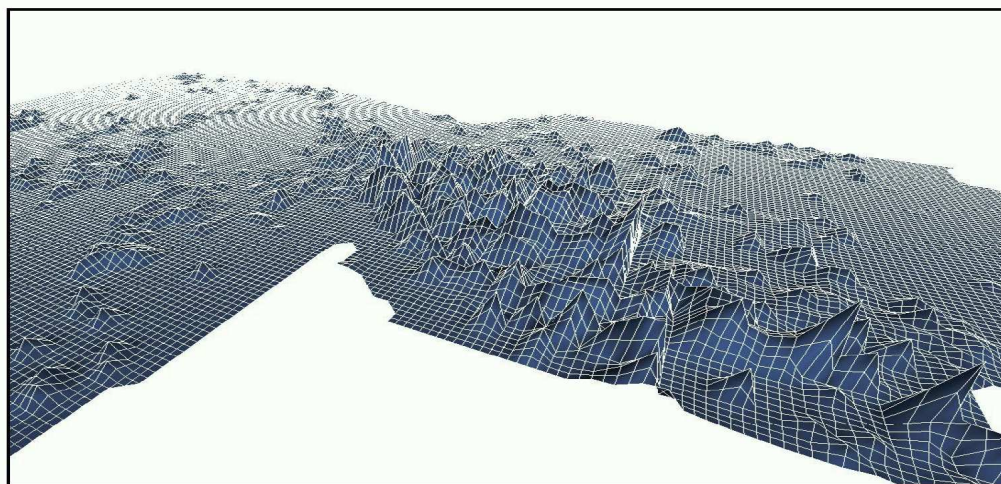


Abbildung 5: Gesamte CO2 Emissionen der Dimension "Haushalt" im Jahr 2009

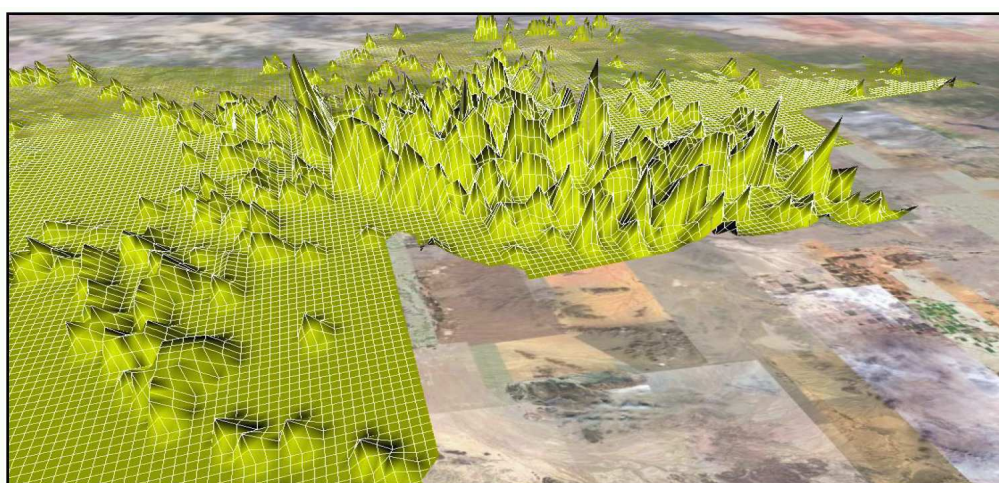


Abbildung 6: Gesamte CO2 Emissionen der Dimension "Verkehr" im Jahr 2009 mit alternativer Perspektivendarstellung sowie Maricopa County Hintergrund, eingefügt mit Hilfe von Google Earth

Durch den Einsatz verschiedener Ebenen und der Wahl des Transparenzgrades (exemplarisch dargestellt in Abbildung 7) sind wir zudem in der Lage, zwei oder mehrere verschiedene Datensets direkt miteinander zu vergleichen. Dadurch kann man auf den ersten Blick etwaige Unterschiede oder auch Schlüsselstellen lokalisieren. Diese Möglichkeit gibt Planern und Entscheidungsträgern bei ihrer täglichen Arbeit ein intuitives Werkzeug an die Hand (z.B. im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung oder bei Besprechungen mit Teilnehmern, die nicht unbedingt über fundiertes Fachwissen verfügen).

Auch für vergleichende Betrachtungen von Berechnungen der verschiedenen Szenarien ist zu sagen, dass unser Ansatz hierfür hervorragend geeignet ist. Eine genauere Betrachtung dieses Umstandes wird Teil unserer zukünftigen Arbeit sein.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Unser Paper beschreibt ein Modell zur Berechnung eines Carbon Footprints auf Nachbarschaftsebene. Bedeutend ist an dieser Stelle, dass dieser Carbon Footprint in Abhängigkeit von spezifischen Verhaltensweisen unterschiedlicher Haushaltstypen erfasst werden kann. Diese hohe Anzahl an Kategorisierungen der Haushaltstypen macht unser Modell einmalig und gibt Nutzern zudem ein detailliertes Hilfsmittel an die Hand, die Einflüsse ihrer täglichen Verhaltensweisen auf die Umwelt einschätzen zu können. Weiterhin präsentiert unsere Arbeit eine effiziente Form einer dreidimensionalen Visualisierung räumlicher Daten. Wie wählten Höhenfelder, da diese leicht zu verstehen sind, insbesondere in Verbindung mit einer zugrunde liegenden topographischen Karte. Außerdem sind sie in der Lage, multidimensionale

Daten anschaulich darzustellen. Mögliche Alternativen, wie z.B. der Einsatz verschiedener Farben auf einer zweidimensionalen Karte sind kritisch zu betrachten. Einzelne bedeutsame Punkte (single spots) könnten bei so einer Art der Darstellung leicht übersehen werden, obwohl sie wohlmöglich von großer Bedeutung sind.

Führen wir uns rückwirkend Abbildung 1 (Dimensionen eines kombinierten Carbon Footprints) noch einmal vor Augen, so darf nicht vergessen werden, dass neben „Haushalt“ und „Verkehr“ die Dimension „Industrie“ eine wichtige Einflussgröße auf einen gesamten Carbon Footprint Wert darstellt. Dies wird ebenso Gegenstand zukünftiger Arbeit sein, als auch eine Aufstockung unserer verschiedenen Haushaltskategorien. Ziel wird es sein, die Anzahl der verschiedenen Haushaltstypen zu vergrößern, um noch detaillierte Aussagen über Carbon Footprints im Bereich „Haushalt“ treffen zu können. Letztlich stellt unsere Arbeit einen wichtigen Schritt in Richtung Aufklärung über CO<sub>2</sub> Emissionen dar. Wir denken, dass die Bevölkerung besser über die Auswirkungen ihres Konsumverhaltens oder auch ihrer Lebensstile auf die Umwelt informiert werden muss, um die Tragweite ihrer Entscheidungen erkennen und richtig einschätzen zu können.

## 6 LITERATUR

- UNITED NATIONS: Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Official website January 2009: [www.un.org/esa/population/unpop.htm](http://www.un.org/esa/population/unpop.htm)
- JÖST, Frank: Der Beitrag der Bevölkerungsentwicklung zum Wachstum der CO<sub>2</sub>-Emissionen, University of Heidelberg, 1999
- VULCAN PROJECT: Official website October 2008: [www.purdue.edu/eas/carbon/vulcan/research.html](http://www.purdue.edu/eas/carbon/vulcan/research.html)
- WEBER, Christopher L.: Trade, consumption, and climate change: an input-output study of the United States, Pittsburgh, 2008
- WENTZ, E.A., GOBER, P., BALLING, R.C., DAY, T.A.: Spatial Patterns and Determinants of Winter Atmospheric Carbon Dioxide Concentrations in an Urban Environment, Tempe, AZ, 2002
- JONES, Christopher M.: A Lifecycle Assessment of U.S. Household Consumption: The Methodology and Inspiration behind the “Consumer Footprint Calculator”, University of California, 2005
- BRYAN, Harvey: An analysis of two proposed CO<sub>2</sub> calculation protocols for buildings, Tempe, AZ, 2007
- BERKELEY INSTITUTE OF THE ENVIRONMENT: Official website December 2008: <http://coolclimate.berkeley.edu/documentation>
- URBANSIM: Official website October 2008: [www.urbansim.org](http://www.urbansim.org)
- ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION: Official Energy Statistics from the U.S. Government, Official website January 2009: <http://www.eia.doe.gov/pub/oiaf/1605/cdrom/pdf/e-supdoc.pdf>
- U.S. DEPARTMENT OF LABOR, Bureau of Labor Statistics, Division of Consumer Expenditure Survey: 2006 Consumer Expenditure Diary Survey, CD-Rom, 2008
- PETSCH, S., HEISCHBOURG, L., MÜLLER, K., GUHATHAKURTA, S., HAGEN, H.: Visualizing Urban Sprawl, In Conference Compendium of IEEE Visualization Conference 2008, Columbus, OH, 2008
- FARIN, Gerald: Curves and Surfaces for CAGD, Wiesbaden, 1994